Bred innføringen i den spesielle relativitetsteorien.

Den spesielle relativitetsteorien

Fysikkelever på videregående skole

Shamas T. Butt

Utgave 1

2016

Forord

Denne boken ble til etter at jeg fikk en enorm inspirasjon da forskerteamet oppdaget for første gang gravitasjonsbølger som ble forutsagt av Albert Einstein sin teori i den generelle relativitetsteorien. Denne ideen om eksistensen av gravitasjonsbølger ble forutsagt for eksakt 100 år siden. En av disse forskere som stod bak denne store oppdagelsen er opprinnelig fra Pakistan og hun heter Dr Nergis Mavalvala. Disse forskere jobbet på noen som heter LIGO (The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) som er et anlegg med den hensikt å oppdage gravitasjonsbølger.

Denne boken er en hyllest til hennes vegne og alle foreldre der ute om oppmuntrer barna sine til å ta høyere utdanning.

Shamas T. Butt
Lektor ved Rud Videregående Skole

Til min mor og far

Den spesielle relativitetsteorien

Situasjonen til fysikken i 1900

Ved inngangen til det nye århundret (1900 tallet), trodde fysikere at de forstod komplett alt om verden. Nye studenter ble nærmest frarådet til å studere fysikk siden det ikke fantes problemstillinger som skulle løses!

Hva hadde fysikere oppnådd i året 1900?

1. Klassisk fysikk (Newton 1687)
    - Beskrivelse av bevegelser
2. Elektrisitet og magnetisme (Maxwell 1873)
3. Termodynamikk (Carnot 1824)
    - Beskrev varme
4. Statistisk Mekanikk (Boltzmann 1896)
    - Bruker statistisk teori til å beskrive system med stort antall partikler
5. Fluid Mekanikk (Navier, Stokes 1822)
    - Beskrivelse av bevegelse i gasser og væsker

Ved 1900 tallet så trodde forskere at det ikke fantes flere ukjente fenomener som en skulle forsøke å forklare. Vel det trodde alle sammen…

Det er sant at disse teoriene beskriver alt det en ser rundt oss veldig godt. Men det er fordi at er STORE og TREGE!

Hvorfor det? Jo man oppdaget to nye fremvoksende nye teorier.

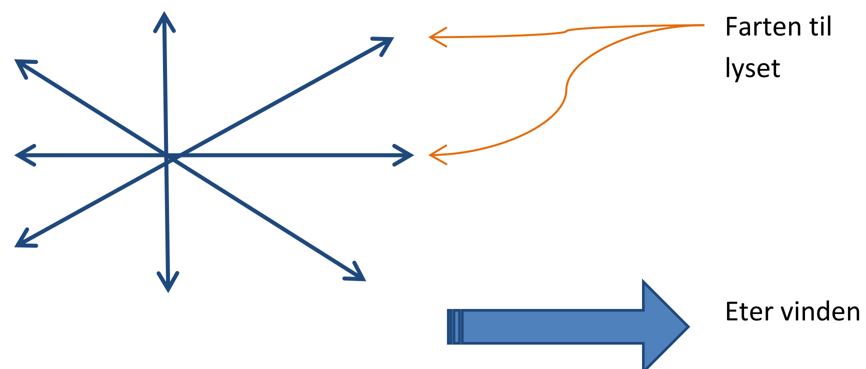
- Ved små skala (størrelsen til et atom), vi trenger kvantemekanikk.
- Ved store fart (nærheten til farten til lyset), vi trenger relativitet.

Disse to teoriene ble oppdaget i begynnelsen av 1900 tallet.

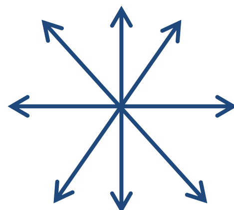
Tidlig historie om relativitetsteorien

Det var to utviklinger som sporet Einstein til hans oppdagelse av relativitetsteori i 1905.

1. Inkonsistensen mellom ligninger til den klassiske mekanikken og likninger til elektromagnetismen.
2. Michelson-Morley eksperimentet
    - De fleste bølgene beveger seg gjennom et medium.
        i. Lydbølger beveger seg gjennom luft.
        ii. Vannbølger beveger seg gjennom vannet.
    - Disse bølgene vil bevege seg med en bestemt fart i forhold til mediumet.
    - Man har hatt mistanke at selv lysbølger må også bevege seg gjennom medium som de kalte for eter. Resultatene en forventet med lysbølger er:
        i. Lysbølger som beveger seg i samme retning som etervinden (med strømmen) bør bevege seg fortere.
        ii. Lysbølger som beveger seg motsatt retning i forhold til etervinden (motstrøm) bør bevege seg saktere. Se figuren



        iii. Det sjokkerende resultatet av Michelson-Morley eksperimentet var at farten til lyset var eksakt det samme i alle retninger!



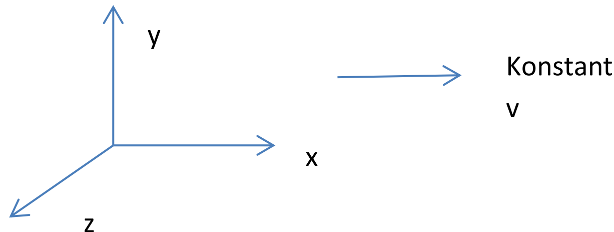
        iv. Altså det var ingen eter! Lys er unntaket til alle andre typer bølger som ikke beveget seg gjennom et medium men heller beveget seg gjennom tomt rom! Farten til lyset er uavhengig av bevegelsen til kilden eller til observatøren.

<u>Postulatene til den spesielle relativitetsteorien</u>

Hvorfor *<u>spesielle</u>?*

Fordi vi ser kun på referansesystemer som er treghetssystemer:

- Ikke-akselerende referansesystemer som beveger seg med konstant fart-
- Referansesystemer hvor Newtons første lover holder.



- Det betyr et tog som beveger seg med en konstant fart. Et romskip som flyter avgårde gjennom det tomme rommet med avslåtte motorer.
- IKKE en bil som akselerer eller bremser eller en bil som tar en sving

Den generelle relativiteten behandler situasjoner hvor referansesystemer gjennomgår en gravitasjonell akselerasjon – matematikken som er involvert her er vanskelig!

POSTULAT 1: Relativiteten

Fysikkens lover er den samme for alle observatører i treghetssystemer.

Kommentarer

Dette høres fornuftig ut – Hvis du spiller tennis med en venn i toget, så du behøver ikke å justere slagene dine for å kompensere toget bevegelse. Men med engang toget tar en sving så du vil oppleve en forskjell, ballen går kanskje ikke rett frem slik du tenkte. Dette skyldes rett og slett fordi toget akselerer →Ikke treghetssystem!

Det er verdt å merke seg at hvis du er i et treghetssystem hvor Newtons første lov gjelder så klarer man ikke å finne ut om du referansesystemet sitt er i ro eller er i bevegelse med konstant fart. De resultatene en får ved målinger som er foretatt på toget er like gyldige om det samme forsøk ble gjennomført på bakken.

POSTULAT 2: Farten til lyset

Farten til lyset i vakuum har den samme verdi i alle retninger og i alle treghetsystemer

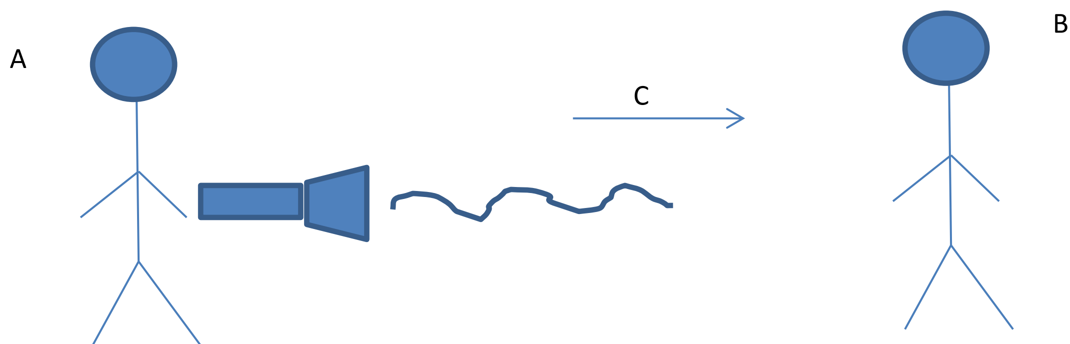
c = 299 792 458 m/s

Kommentarer

Høres ikke helt fornuftig ut! Dett er helt imot våre forestillinger fra hverdagen. Masse eksperimentene har bekreftet dette blant annet det berømte forsøket til Michelson-Morley.

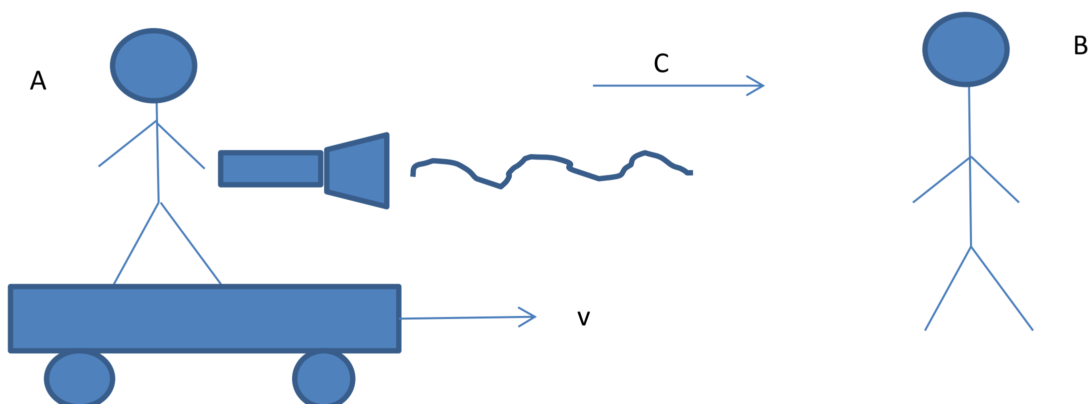
Hva innebærer dette postulatet? Hva betyr dette rent praktisk?

<u>Eksperiment 1:</u>



Observatøren B måler farten til lyset til å være C.

<u>Eksperiment 2:</u>



Observatøren B måler farten til lyset til fortsatt til å være c!! IKKE c+v !

Absolutt rart resultat men det er eksperimentelt bekreftet og det er blitt en etablert sannhet.

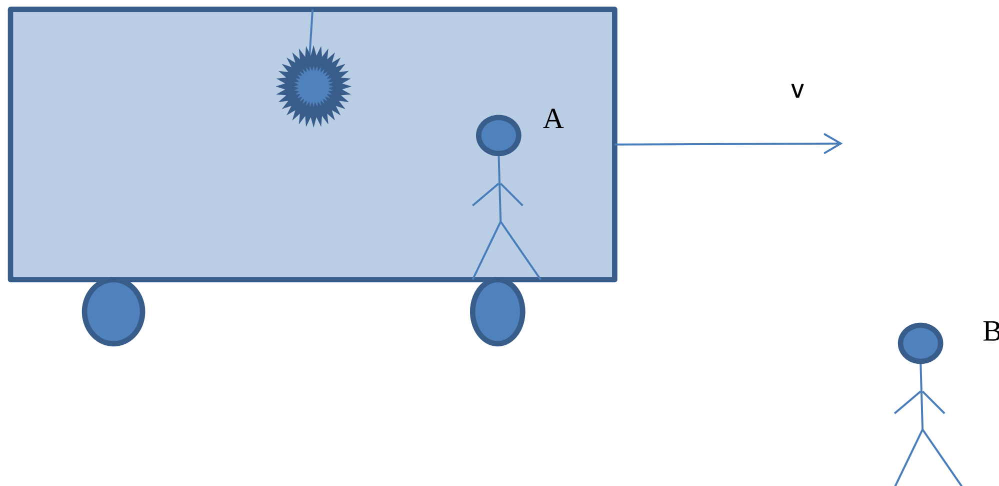
Fra disse to postulatene så medfører dette følgende…

Vi begynner først å betrakte tre fundamentale effekter av relativitet:

1. Relativiteten til samtidighet
2. Tids dilatasjonen
3. Lengde kontraksjon

Samtidighet (simultan hendelse)

La oss se foreta et tankeeksperiment (gedanken eksperiment).



Vi har ei lyspæra som henger fra taket midt på togvogna. Lyset blir svitsjet på.

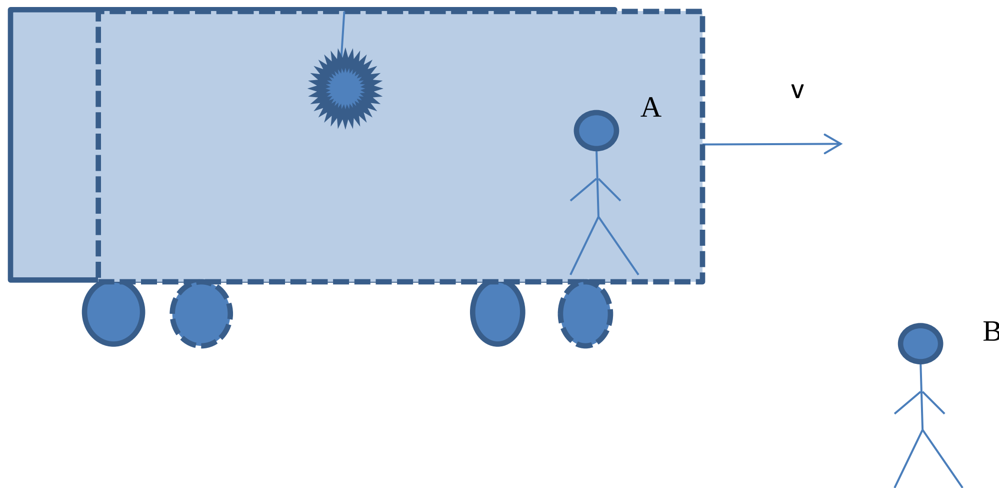
For observatøren A (på toget) så må lyset tilbakelegge den samme distanse mot bakveggen og forveggen til toget. Altså treffer lyset endeveggene til toget samtidig sett fra observatøren A. Disse to hendelsene:

- Lyset treffer bakveggen
- Lyset treffer forveggen

er samtidige. Begge traff samtidig

Men tenk hvordan oppleves det for observatøren som befinner seg på perrongen og ser at lyset blitt slått på. Tenk et øyeblikk før du snur til neste side.

For observatøren B (på perrongen)



Husk det at lys har en endelig fart (ikke uendelig stor fart) så innebærer det at lyset VIL bruke noe tid på å tilbakelegge en viss avstand.

Personen B vil oppleve at imens lyset reiser avgårde vekk fra lyspæra, så har toget selv blitt forflyttet fremover. Det betyr at lyset må tilbakelegge en kortere avstand mot bakveggen enn forveggen – husk toget har flyttet på seg!

Altså observatøren B ser at bakvegen blir lyst opp mens forveggen fortsatt er mørk! Hendelsene:

- Lyset treffer bakveggen før
- Lyset treffer forveggen

Disse to hendelsene er ikke samtidige for observatøren B.

Spørsmål: Hvem av dem har egentlig rett? Er disse hendelsene samtidige eller ikke? Har det skjedd noe juks eller lureri?

Svar: Det er avhengig av hvem som foretar observasjonen, observatøren A eller B. BEGGE observatører, A og B har rett!

Konklusjon:

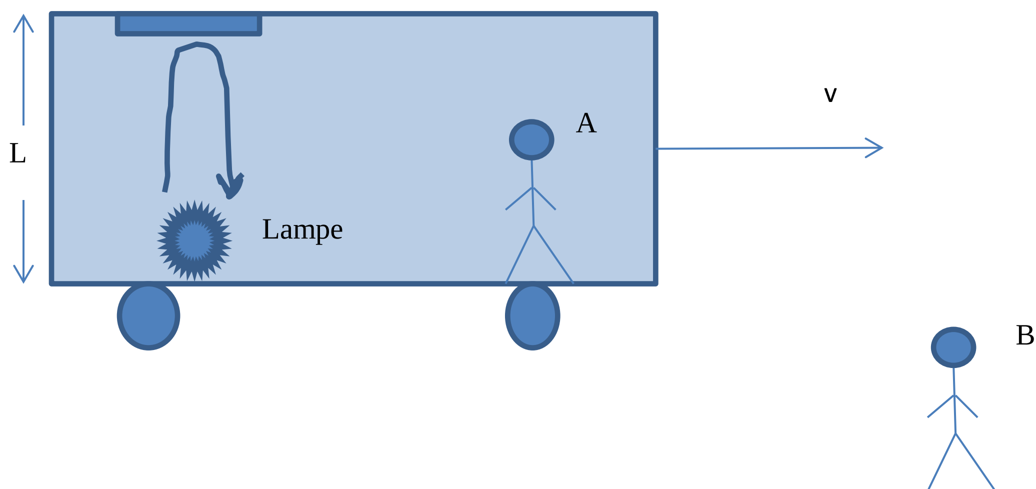
Disse to hendelsene som er samtidige i et treghetssystem er ikke samtidige i et annet treghetssystem

Samtidighet er ikke en absolutt størrelse men heller en relativ størrelse som er avhengig av bevegelsen til observatøren.

Tidsdilatasjonen

Ideen bak dette: Hvis observatøren har en relativ bevegelse til en annen vil måle at tidsintervallet mellom to hendelser vil være generelt forskjellige i forhold til en annen observatør.

La oss foreta et tankeeksperiment: Vi plasser lyskilden på gulvet på toget

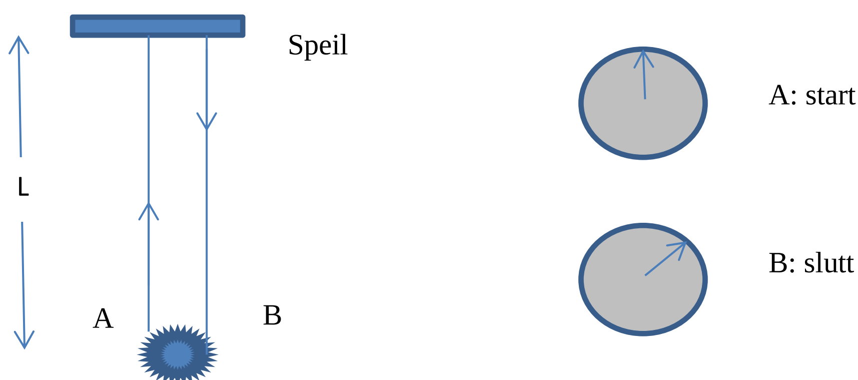


Vi ønsker å måle tidsintervallet mellom to hendelser:

- A: En lyspuls som forlater lyskilden
- B: Lyspulsen treffer gulvet igjen

Observatøren A:

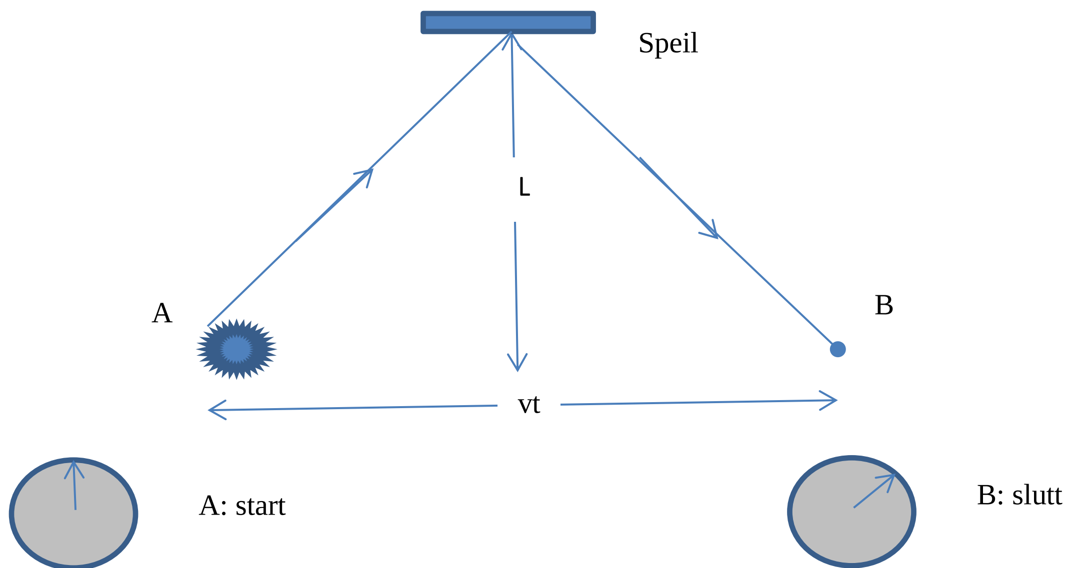
For vedkommende som er på toget så vil disse to hendelser skje på samme sted. La oss se på en annen tegning:



For observatøren A så ser man følgende at tiden det tar for lyspulsen å tilbakelegge en avstand på 2L blir:

$$t' = \frac{2L}{c} \quad ; t' = tiden\ sett\ fra\ observatør\ i\ bevegelse$$

For observatøren B som er på perrongen, så oppleves at disse to hendelsene finner på ulike sted!



Altså:

$$t = \frac{2D}{c} \quad ; t = tiden\ måles\ av\ stasjonær\ observatør$$

Men:

$$D = \sqrt{L^2 + \left(\frac{vt}{2}\right)^2}$$

$$t = \frac{2\sqrt{L^2 + \left(\frac{vt}{2}\right)^2}}{c}$$

$$c^2t^2 = 4\left(L^2 + \left(\frac{vt}{2}\right)^2\right)$$

$$c^2t^2 = 4L^2 + v^2t^2$$

$$c^2t^2 - v^2t^2 = 4L^2$$

$$t^2(c^2 - v^2) = 4L^2$$

$$t^2 = \frac{4L^2}{c^2 - v^2}$$

$$t = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

$$t = \frac{\frac{2L}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$Siden\ vi\ vet\ at\ t' = \frac{2L}{c}, dette\ kan\ man\ sette\ inn\ og\ få$$

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Vi definerer LORENTZ FAKTOREN:

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Da blir det:

$$t = \gamma t'$$

Siden v < c, så betyr det $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ altså $\gamma > 1$!

Altså

$$t > t'$$

KONKLUSJON: Observatøren B (personen på perrongen) vil måle en lengre tidsintervall enn observatøren A (på toget).

La oss si at lyspulsen tar 3 sekunder å treffe gulvet igjen, da vil personen B si at det tok 5 sekunder å treffe gulvet igjen.

Altså kan vi si følgende

Klokker i bevegelse går saktere

Dette er hva vi mener med tidsdilatasjonen.

Dere har sikkert masse spørsmål rundt dette, men la meg ta de to mest viktige spørsmålene en får.

Spørsmål: Hvem har rett, er det observatøren A eller B?

Svar: Begge har rett siden de observerer fra deres eget referansesystem. Tiden er som samtidighet, en relativ størrelse. Husk at personen på toget har sin fulle rett å påstå at det er han som faktisk står i ro og at det er personen på perrongen som raser forbi ham. Da vil han måle like rar resultat som han som stod på perrongen!

Spørsmål: Hvorfor observerer ikke vi tidsdilatasjonen i våre hverdagslige liv?
Svar: Vi lever i verden hvor ting beveger seg veldig T R E G E!
I våre liv så er følgende sant at $v \ll c$.
Altså: $= \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$
→ $t = t'$
→ Ingen tidsdilatasjon!

Tidsdilatasjonen gjør seg gjeldene når farten er $v > 0{,}1\ c$. Det er passende å reflektere over dette resultatet. En god og bedre teori bør inneholde den gamle teorien den prøver å avskaffe og gi samtidig en ny innsikt. Det er nettopp det Albert Einstein gjorde da han la frem denne teorien. Vi ser at ved lave fart så fungerer denne tidsdilatasjonsformelen en bruker for å beregne tidsintervallet som en bruker klassiske formler.

Et regneeksempel:

Et myon partikkel som er i ro har halveringstid (levetiden) lik $2 * 10^6 sekunder$. Når partikkelen farer avgårde gjennom laboratoriet med farten lik $v = \frac{3}{5}c$, hva blir levetiden til myonet?

Løsning:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{3}{5}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{9}{25}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{16}{25}}} = \frac{1}{\frac{4}{5}} = \frac{5}{4}$$

Altså:

$$t = \gamma t'$$
$$t = \frac{5}{4}(2 * 10^6)sek = \underline{2{,}5 * 10^6 sek}$$

<u>Tvillingsparadokset</u>

Ali og Fatima er tvillinger. Den dagen begge fyller 21 år gamle velger Fatima å ta en tur på et romskip som flyr avgårde med farten $v = \frac{12}{13}c$. Etter at det har passert eksakt 5 år følge klokka til Fatima så velger hun å snu og reise tilbake til jorda for å treffe broen sin. Hun reiser med like stor fart og denne tilbaketuren tar også eksakt 5 år. Ali ble jo som kjent værende på jorda i den lange turen til Fatima.

Spørsmål: Hvor gamle er tvillingene når de møtes sammen igjen?

Svar:

Fatima som reiste: $21 år + 5\ år + 5\ år = \underline{31\ år}$

Ali på jorda:

Ali forstår at det er klokka til tvillingen Fatima som klikker saktere siden det er hennes klokke som har fart. Det medfører at Ali blir eldre enn Fatima. La oss finne ut hvor mye eldre blir hun.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{12}{13}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{144}{169}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{25}{169}}} = \frac{13}{5}$$

Altså blir tidsforlengelsen: $t = \gamma t' = \frac{13}{5}(10\ år) = 26\ år$

Det vil si at Ali ble $21 + 26\ år = \underline{47\ år\ gammel}$

Konklusjon: Den reisende tvillingen har reist inn i fremtiden ved å ta et romskip som beveger seg nesten med lysets hastighet. Dette er mulig på grunn av tidsdilatasjonen – Klokke i bevegelse går saktere.

Spørsmål: Hva er paradokset i dette?

Svar:

Paradokset oppstår når vi begynner å fortelle denne historien fra en annen observatør, nemlig fra Fatima sin side. Sett fra hennes side så observerer hun at det er Ali og sammen med jorda som farer avgårde med farten på $\frac{12}{13}c$ og som snur etter 5 år og møter henne igjen. Ifølge Fatima så er det broren hennes på jorda som er i bevegelse, følgelig så vil klokka hans gå saktere og bure være yngre enn henne når de møtes sammen!

Spørsmål: Men hvem av de to som faktisk er yngre enn den andre når de møtes sammen?

Svar:

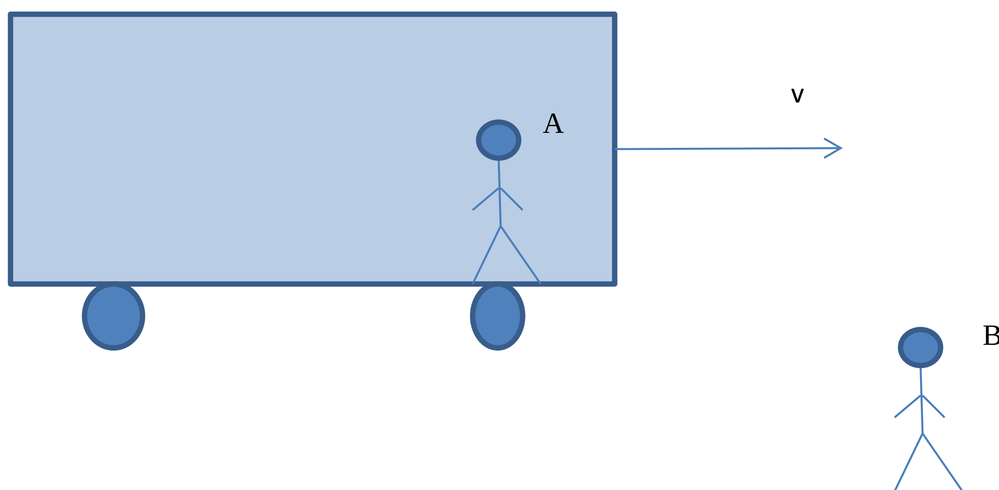
Den reisende tvillingen befinner seg faktisk ikke i er treghetssystem under hele reisen. Det skyldes at hun måtte snu romskipet og dermed opplever akselerasjon. Romskipet måtte bremses og akselerere under denne snu operasjonen. Så hennes beskrivelse er rett og slett feil. Den spesielle relativiteten fungerer bare i konstant fart.

Tvillingbroren Ali som befinner seg på Jorda er hele tiden i et treghetssystem, så hans analyse er korrekt. Han eldes raskere og ser søsteren komme tilbake yngre slik vi har regnet ut.

Lengde kontraksjon

Tanken er som følgende: Et objekt i bevegelse virker som om den er kortere i bevegelsesretningen,

La oss foreta nok engang et tankeeksperiment



Hva er lengden på toget?

For å svare på dette så må vi finne ut hvordan kan man måle noe slikt. La oss se på følgende måte. Vi plasserer lampe helt til veggen på toget og plasserer et speil i motsatt ende.

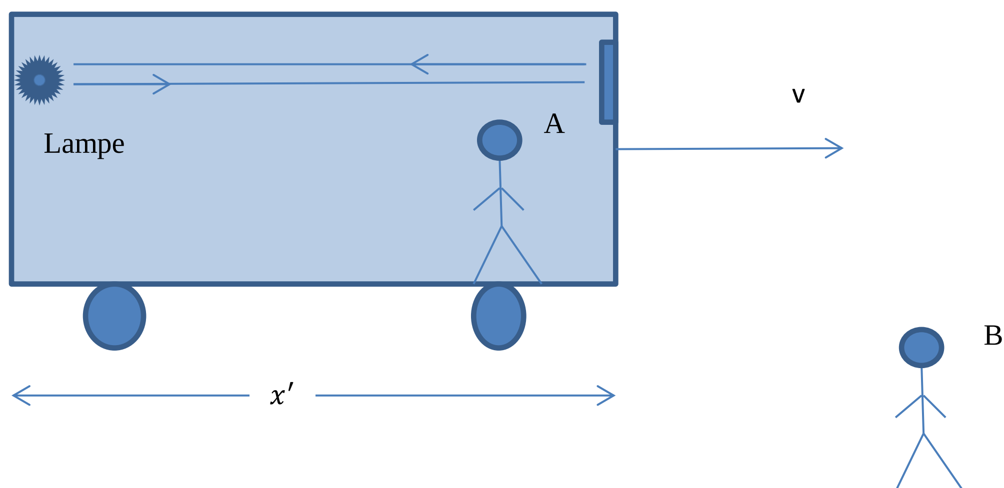
Da er vi interessert i to hendelser

- A: En lyspuls forlater lampen
- B: Lyspulsen til den returnerte lyset som treffer lampen igjen.

Spørsmål: Hva er tidsintervallet mellom de to hendelsene?

Svar:

Vi er interessert i følgende situasjon

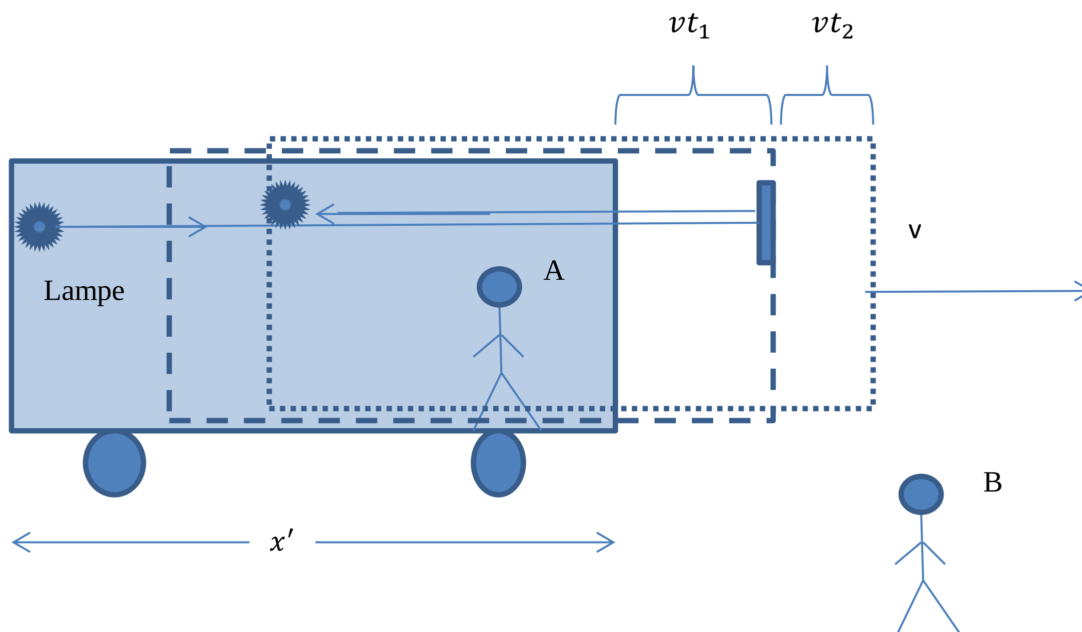


Lyset tilbakelegger en avstand på $2x'$, hvor da avstanden x' er lengden til toget målt av observatøren A. Farten til lyset er for alle observatører alltid lik c.

Så tidsintervallet blir $t' = \frac{2x'}{c}$

Men hva med observatøren B som iakttar denne hendelsen sett fra perrongen?

Situasjonen er noe komplisert siden toget har en bevegelse samtidig. Da blir det slikt



La
t_1= tiden det tar for lyspulsen når den treffer endeveggen til høyre
t_2= tiden det tar for lyspulsen når den treffer igjen tilbake på venstre side.

Lyspulsen som reiser fremover vil tilbakelegge en avstand gitt ved $x + vt_1$, hvor x er lengden på toget sett fra observatøren B. Tillegg avstanden på vt_1 er en ekstra lengde som lyspulsen må tilbakelegge for å treffe fremre veggen siden toget samtidig har flyttet på seg litt fremover. Da har vi

$$t_1 = \frac{x + vt_1}{c}$$

Løser uttrykket på hensyn på tiden så får vi

$$ct_1 = x + vt_1$$
$$(c - v)t_1 = x$$
$$t_1 = \frac{x}{c - v}$$

Ved tilbaketuren så vil lyspulsen tilbakelegge en kortere avstand på $x - vt_2$. Grunnen til det er at bakre veggen til toget også har flyttet på seg fremover. Da har vi

$$t_2 = \frac{x - vt_2}{c}$$

Løser uttrykket på hensyn på tiden så får vi

$$ct_2 = x - vt_2$$
$$(c + v)t_2 = x$$
$$t_2 = \frac{x}{c + v}$$

Den totale avstanden som lyspulsen tilbakelegger ved de to hendelsene A og B som vi var interessert i blir da: $t = t_1 + t_2 = \frac{x}{c-v} + \frac{x}{c+v}$.

Legg merke til at det ikke noe merket på symbolene, altså sett fra en stasjonær observatør.

La oss forenkle dette uttrykket

$$t = \frac{x}{c - v} + \frac{x}{c + v}$$
$$t = \frac{x \cdot (c + v)}{(c - v) \cdot (c + v)} + \frac{x \cdot (c - v)}{(c + v) \cdot (c - v)}$$
$$t = \frac{xc + xv + xc - xv}{c^2 - v^2}$$
$$t = \frac{2xc}{c^2 - v^2}$$
$$t = \frac{2x/c}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

La oss sette alt sammen.

Tiden som observatøren A måler på toget er

$$t' = \frac{2x'}{c}$$

Tiden som observatøren B måler fra perrongen er

$$t = \frac{2x/c}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Men oppe i det hele så må vi ikke glemme at en gjenstand i bevegelse så vil klokken gå saktere altså tidsdilatasjonen vil finne sted. Da vet at tiden en måler sett fra observatøren B vil være større med en faktor på γ, altså $t = \gamma t' = \frac{t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

Ved å sette disse to tidene så får vi:

$$t = \gamma t'$$
$$\frac{\frac{2x}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \gamma \cdot \frac{2x'}{c}$$
$$\frac{2x}{c \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2x'}{c \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$\frac{x}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$x = x' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Husk at vi hadde følgende: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \leftrightarrow \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{1}{\gamma}$

Da blir det følgende:

$$x = \frac{x'}{\gamma}$$

Dette er hva vi mener med lengde kontraksjon.

Husk at $\gamma > 1$ altså $x < x'$

Observatøren B på perrongen vil måle an kortere lengde av toget enn hva observatøren A vil måle. Siden toget er i bevegelse sett fra observatøren B så kan man oppsummere slikt:

Objekter i bevegelse blir kortere

Dette er hva vi mener med lengde kontraksjon.

Spørsmål: Observatøren A vil påstå at det er perrongen til observatøren B som blir lengdekontrahert mens A er selv i ro. Hvem har da rett?

Svar: Begge! Lengde samme som samtidighet og tid er relative størrelser.

Spørsmål: Hvorfor observerer vi ikke disse lengdekontraksjoner i våre liv?

Svar: Vi er T R E G E !!

Husk i våre liv så er farten $v \ll c$. Det medfører at $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$

Altså at $x = x'$ INGEN LENGDEKONTRAKSJON

Som nevnt tidligere teoriene til Albert Einstein er mye bedre enn den klassiske fordi den fungerer helt fint ved veldig lave fart og ved store fart hvor det sistnevnte feiler i den klassiske fysikken. Sagt med annet ord gyldighetsområdet er stort.

Et regneeksempel

En person befinner seg i et romskip og han måler lengden på romskipet til å være 130 meter lang. Romskipet flyr forbi romstasjonen med en fart på $v = \frac{12}{13}c$. Hva er lengden på romskipet slik observatøren måler det sett fra romstasjonen?

Løsning:

Vi vet at x' = 130 meter. Vi ønsker å finne x.

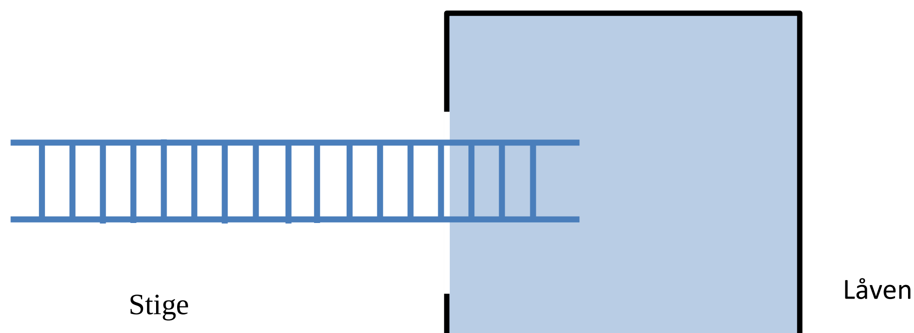
Vi beregner først lorentz faktoren: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{12}{13}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{144}{169}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{25}{169}}} = \frac{13}{5}$

Da blir $x = \frac{x'}{\gamma} = \frac{130m}{\frac{13}{5}} = \frac{5}{13} \cdot (130\ meter) = \underline{50\ meter}$

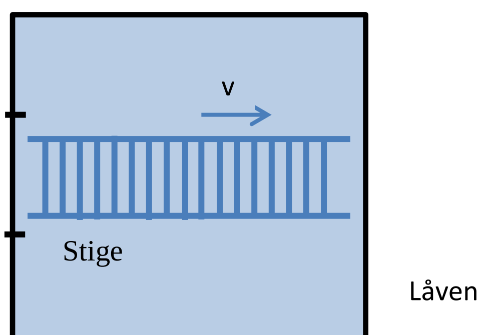
Romskipet ser kortere ut!

Stige i låven paradokset

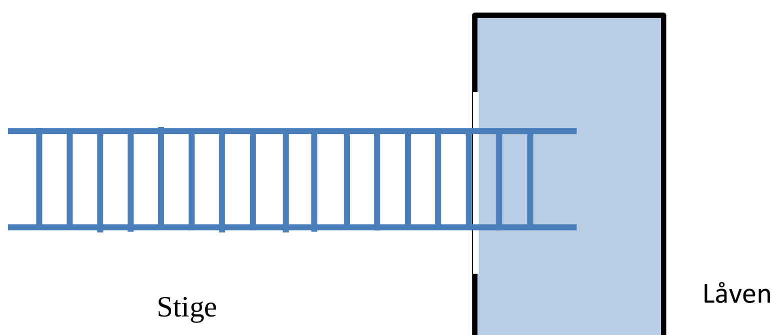
Dette paradokset har mange navn. Tanken er som følgende: Det var en bonde som hadde en stige som var for lang til at den kunne passe inn i låven hans. Se figuren nedenfor.



Bonden erindrer fra gamle dager at han lærte om relativitetsteorien fra skolen. Han forklarer datteren og instruerer henne om å løpe med stigen så fort hun kan gjennom låven. Det er slik at siden datteren og stigen er i bevegelse så vil de bli lengdekontrahert. Da skal bonden klare å slenge døra like etterpå.



Datteren protesterte og mente at sett fra hennes side så vil låven bevege seg og dermed så er det låven som blir lengdekontrahert. Da vil stigen passe enda dårligere med å få plass i låven!



Spørsmål: Hvem har rett? Vil stigen få plass i låven eller ikke?

Svar:

La oss se på to hendelser

- A: Bakerste delen av stigen kommer innsiden av døra.
- B: Forreste delen av stigen treffer veggen til høyre til låven.

Sett fra bonden, så vil hendelse A inntreffe før hendelse B.
Det betyr at det er en viss mulighet at stigen faktisk var innsiden av låven.

Sett fra datteren side, så vil hendelse A inntreffe etter hendelse B.
Det betyr at det fins ingen mulighet at stigen noen gang var innsiden av låven

Dette er ikke en motsigelse av de to beskrivelsene. Forskjellige hendelser KAN skje i ulik rekkefølge for ulike observatører. Det er hva relativitet dreier seg om. Det du observerer er ikke nødvendig det samme som jeg observerer. Alt er relativt unntatt lysfarten.

Spørsmål: Hva vil skje med stigen i det øyeblikket vi velger å stoppe opp? Vil den fortsatt få plass i låven?

Svar: Bemerk at vi nå har introdusert ett nytt element i denne historien nemlig å få stigen til å stoppe. Nå beveger den seg ikke lenger. Selvfølgelig så vil stigen utvide seg tilbake til opprinnelige lengden sett fra bonden side. Enten så vil stigen gå gjennom i begge endeveggene til låven eller at stigen blir knust innsiden av låven!

Konklusjon: Lengde kontraksjon av stigen tillater IKKE at den kan la seg få plass i låven! ☺